

## SDR干渉計を用いた見通し外電波伝搬観測システムの構築と地震予知の可能性

著者	森 勝哉
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	60
ページ	1-6
発行年	2019-03-31
URL	<a href="http://doi.org/10.15002/00022082">http://doi.org/10.15002/00022082</a>

# SDR干渉計を用いた見通し外電波伝搬観測 システムの構築と地震予知の可能性

## CONSTRUCTION OF OVER-HORIZON PROPAGATION OF RADIO WAVES OBSERVATIONS SYSTEM USING INTERFEROMETRY OF SOFTWARE DEFINED RADIO TECHNOLOGY AND POSSIBILITY OF EARTHQUAKE PREDICTION

森 勝哉

Katsuya Mori

指導教員 春日 隆

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻創生科学系修士課程

In the previous study, the following two points are stated. First, the VHF transmitter signals are scattered by atmospheric disturbance. Second, VHF transmitter signals, which should not normally be received at the observation point, are received. Therefore, in order to realize short-term earthquake prediction, we construct the observation system of over-horizon VHF transmitter signals related to the earthquake. We used the Software Defined Radio (SDR) instead of the receiver used in the conventional system. As a result, cost and space can be saved, and we aim to construct a VHF interferometer system simply.

**Key Words :** VHF transmitter signals, earthquake prediction, SDR, VHF interferometer

### 1. 序論

通常, FM 放送や航空管制通信などに用いられている VHF 帯の電磁波は, 波長が短く電波の直進性が強い. そのため VHF 帯電波は大気中を直進し, 電離圏を突き抜けて通過してしまうため, 直線的に電波が届く見通し距離しか伝搬することができない. しかし, 流星や太陽フレアなどによって電離圏もしくは大気圏の電子密度が変化し, VHF 帯の電波が反射・散乱され, 普段は受信することのできない見通し距離外の電波を受けることがある.

流星電波観測を行っていた八ヶ岳南麓天文台の串田嘉男氏や電離層の異常や雷や電波雑音の観測を行っていた北海道大学大学院理学院附属地震火山研究観測センターの森谷武男氏によると, 地震発生前後においてもこのような見通し外伝搬が起こると報告されている.

見通し外 VHF 電波伝搬を用いて電磁気学的な地震前兆

現象を検知して予知するという研究を知り, 地震情報を地面・地下から得るのではなく, 大気圏や電離圏などの上空を観測するといった新たな視点での地震に対する見方に興味を持ち, 本研究を進める動機となった.

VHF 帯干渉計システムを構築するにあたり, 現在 VHF 帯電磁気学的地震前兆を検出するために用いられている汎用的な広帯域受信機または FM デジタルチューナーが用いられている. 本研究では受信機としてソフトウェア無線 (SDR : Software Defined Radio) と呼ばれる USB ドングルを用いることにより, 受信機の設定をソフトウェア上で行い, より安価かつ省スペース化することが可能になる. 干渉計システムを構築する上で受信機が多数必要になることを考慮し, SDR を用いた VHF 帯観測システムを構築することを目指す.

## 2. VHF 帯域電波の伝搬

### (1) 大気中の電波通路

見通し外電波伝搬を考える上で、受信局は送信局からの直接波が届かないような距離を保つ必要がある。

地球の中心を点  $O$  とすると、図 1 が示すように、直進する電波の到達限界である幾何学的見通し距離  $L$  は、送信点の地上高  $H$ 、受信点の地上高  $h$ 、地球半径  $R$  とすると、2 つの三角形  $\triangle TPO$  と  $\triangle RPO$  について三平方の定理を用いて、以下のように表すことができる。

$$L = L_1 + L_2 = \sqrt{2HR(1 + \frac{H}{2R})} + \sqrt{2hR(1 + \frac{h}{2R})} \quad (1)$$

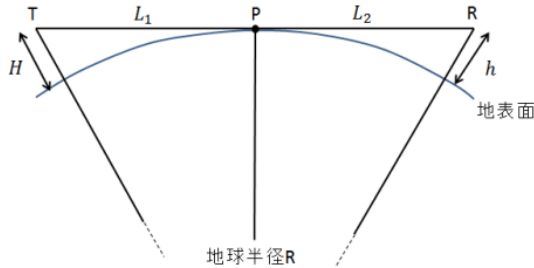


図 1 幾何学的見通し距離[1]

送受信点の地上高に比べて、地球半径は十分大きいことを考慮すると以下のように近似でき、地球半径  $R \cong 6370[\text{km}]$  を代入すると、幾何学的見通し距離  $L$  は、

$$L = 3.57(\sqrt{H} + \sqrt{h}) \quad [\text{km}] \quad (2)$$

となる。(ただし、アンテナの高さ( $H$ ,  $h$ )は単位[m]である。)

本研究において、見通し外電波伝搬を観測するために、式(2)より送受信点の地上高から求めた幾何学的見通し距離  $L$  以上の距離で送受信点を決める必要がある。

### (2) 臨海周波数とセカントの法則

上空に電波を垂直に発射する場合を考える。発射電波の周波数を高くしていくと、ある周波数以上に達すると、電波は電離層を突き抜けて反射されることはなくなる。この電離層を突き抜けてしまう最低の周波数を臨界周波

数(突き抜け周波数)と呼ぶ。臨界周波数の値が既知である時、電離層の最大電子密度も理論的に求めることができ、臨界周波数  $f_c$  は最大電子密度  $N_{max}$  の平方根に比例し、

$$f_c \cong 9\sqrt{N_{max}} \quad [\text{kHz}] \quad (3)$$

で表される。電子密度は太陽の黒点数によって大きく変化する。[2]

臨界周波数は、電波を垂直に上空に打ち上げ、電離層に垂直に電波が入射した場合についてであるため、電波を電離層に対して斜めに入射した場合、臨界周波数を直接的に用いることはできない。

図 2 に示すように、角度  $\theta$  で電波が電離層に入射した場合、臨界周波数  $f_c$  に比べて高い周波数  $f_{MU}$  まで反射可能となる。斜め入射時のこの周波数  $f_{MU}$  を MUF (Maximum Usable Frequency : 最高使用可能周波数) と呼び、

$$f_{MU} = f_c \sec \theta \quad (4)$$

の関係を持っており、これをセカントの法則(正割法則)と呼ぶ。

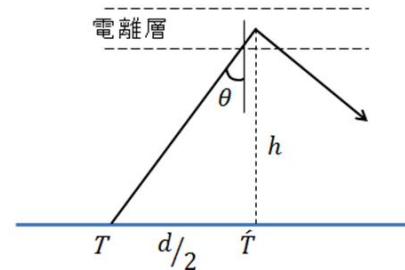


図 2 電離層への角度  $\theta$  での電波入射

図 2 のように、電波が電離層に突入し、直進して反射すると仮定した場合における見かけの高さを  $h$ 、受信局から送信局までの距離を  $d$  とすると、 $\sec \theta = \frac{1}{h} \sqrt{(\frac{d}{2})^2 + h^2}$  で表すことができるため、MUF は幾何学的に次のように書き換えられる。

$$f_{MU} = f_c \cdot \frac{1}{h} \sqrt{(\frac{d}{2})^2 + h^2} \quad (5)$$

(<http://wdc.nict.go.jp/ISDJ/ionospheric-alert.html>)

NICT Ionospheric alert において、東京都国分寺 (NICT: 情報通信研究機構 本部) での電離圏概況を確認したところ、2018 年 11 月 29 日 12:45 地点での過去 40 日間における 12:45 での F 層臨界周波数中央値はおよそ 6.1MHz, スポラディック E 層<sup>1</sup>臨界周波数中央値はおよそ 4.4MHz であり、2018 年 11 月 29 日 18:30 地点での過去 40 日間における 18:30 での F 層臨界周波数中央値はおよそ 3.0MHz, スポラディック E 層臨界周波数中央値はおよそ 4.0MHz であった。また、2018 年 12 月 3 日 13:30 において 14.3MHz のスポラディック E 層臨界周波数を観測した模様である。これらのデータより、F 層での反射を高度 300km, スポラディック E 層での反射を高度 100km として、各電離圏における MUF と送受信間距離の関係を図 3 に示す。

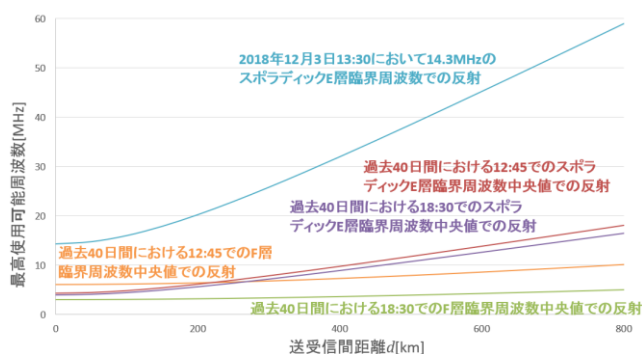


図3 各電離層領域の反射におけるMUFと送受信間距離

図3より、昼夜においてF層臨界周波数を比較した場合、昼でのF層臨界周波数の方が高くなっている。同様に、昼夜においてスポラディックE層臨界周波数を比較した場合も、昼でのスポラディックE層臨界周波数の方が高くなっていることが確認でき、太陽活動(紫外線)により夜間よりも昼間の方が電子密度は大きく、昼間と夜間において電波の伝搬状態が変化することがわかる。上の層ほど紫外線が強く、多くの電離が生じるため電子密度が大きくなるが、突発的・局所的に発生するスポラディックE層の影響により、通常は電離圏で反射されないFM放送などのVHF帯の電波が反射されて異常伝搬する可能性があることがわかる。

### 3. SDR 干渉計を用いた見通し外 VHF 電波伝搬観測

#### (1) 観測システム

本研究において構築した見通し外電波伝搬観測システムを図4に示す。

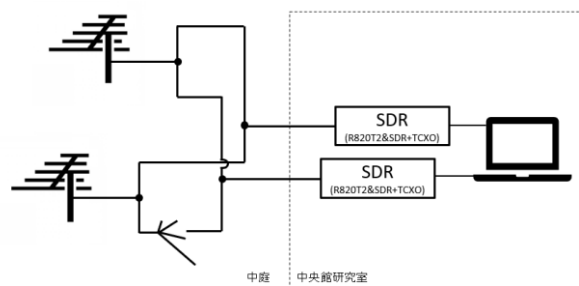


図4 見通し外電波伝搬観測システム

本研究におけるシステムは、2本の八木アンテナ、4つの2分配器、2つのDVB-T+FM+DAB(820T2&SDR)からなる。受信アンテナは76~90MHz帯の5素子の八木アンテナを使用しており、5C-FB同軸ケーブルを繋いでいる。アンテナの仰角は $0^{\circ}$ である。分配器はMSPRO SP2CADを使用しており、アンテナから入力された信号を分配し、さらにもう片方のアンテナからの信号と混合(合成)するために使用している。図4における点の部分の部分が分配・混合器の意味を成している。片方のアンテナから分配されたケーブルに対して波長の1/4, 1/2, 1, 2倍の長さのケーブルを用意し、コネクタを通じて付け替えを行えるシステムになっている。ケーブル長の微妙なずれなどによって生じた位相差を調整し、ケーブル長を変化させることによって目的の送信局方向の角度の中で測定を行うことができる。その後、ケーブルを中央館研究室内に引き込み、SDR(DVB-T+FM+DAB(820T2&SDR))に繋がれている。SDRはPCに接続されたUSBハブを通じてPC内で測定を行う。PCにおいて使用しているソフトウェアとして、SDR Console(V3)を用いており、受信機の設定などをPC内で操作する。周波数の決定やモードの変更などの設定を行い、縦軸信号強度、横軸が周波数のスペクトルアナライザの役割や縦軸信号強度、横軸が時間のシグナルヒストリーを測定しており、シグナルヒストリーのデータはCSV

<sup>1</sup> スポラディックE層(Es層)とは、散発的に現れる電子密度の高い領域であり、数時間ほどVHF電波をも反射し続ける。通常、VHF/UHF以上の高い周波数の電波は、電離圏を突き抜けて直進するが、電離圏は1日の時間帯によって反射する周波数の帯域が異なる現象が起こり、普段聞くことができない海外ラジオ放送が聞こえることもある。

ファイルとして保存が可能になっている。また、流星電波観測用ソフトウェアとして、MROFFTを使用した。10分間で1枚の画像データとして収集を行うことができ、横軸は時刻、縦軸は周波数を示しており、700kHz～900kHzにおける受信強度の積分値が表示されている。積分強度の目盛は10dB/divであり、流星エコーであるかどうかを判断するための判定として用いることが可能である。

## (2) 干渉計システムの精度

図5はVHF帯電波干渉計の原理を示したものである。送信局から反射された電波が両アンテナを結ぶ線に対する垂線の方角より角度 $\theta$ 離れて到来したとすると、2本のアンテナで受信された電波の位相差 $\delta$ は各アンテナの行路差 $l$ によって生じ、以下のような式が成り立つことがわかる。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\delta}{2\pi d}\right) \quad (6)$$

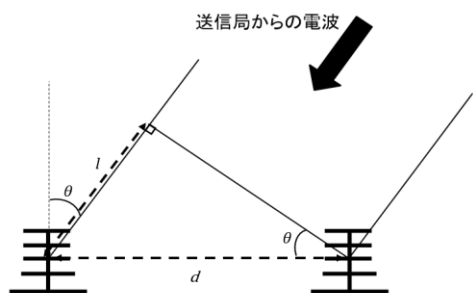


図5 電波干渉計の原理

アンテナの間隔を $d=13\text{m}(\cong 5\lambda)$ とした場合、干渉計の分解能は $\frac{\lambda}{d}=0.2[\text{rad}]=11.5^\circ$ であり、式(6)へ代入すると、 $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\delta}{10\pi}\right)$ となる。位相差 $\delta$ の値を $-1080^\circ$ から $1080^\circ$ まで $90^\circ$ ずつとして電波到来角 $\theta$ （方位角方向での分解能）の値を求め、横軸を位相差[degree]、縦軸を電波到来角[degree]としてグラフにしたものを図6に示す。

受信局（法政大学小金井キャンパス中庭）での緯度経度は $(35.71013^\circ\text{N}, 139.52222^\circ\text{E})$ であり、目標送信局（大島VOR）での緯度経度は $(34.69195^\circ\text{N}, 139.41406^\circ\text{E})$ で、送受信間距離はおよそ114kmである。北を $0^\circ$ 、東を $90^\circ$ 、南を $180^\circ$ 、西を $270^\circ$ とした場合、受信局から送信局への方角はおよそ $185^\circ$ である。アンテナの方向を方位角 $160^\circ$ から $210^\circ$ まで $5^\circ$ ずつずらして、それぞれの信号強度を測

定し、干渉計システムの精度評価を行う。目的周波数は113.10MHzの大島VOR/TAC（東京都大島町差木地字奥山1146）である。SDR Console(V3)では、設定周波数を113.100800MHzのLSBモード、RF Gain: 49.6dB, Visual Gain: 30dB, Filter: 2.8kHz, Bandwidth: 2048kHzで設定を行った。図6での計算より、電波到来角の理論値は $\theta = 9.6^\circ$ である。実験日時は2019年2月14日19:15～20:30で行った。それぞれのSDRでの信号強度を測定し、横軸をアンテナ方位角としたときのグラフを図7に示す。

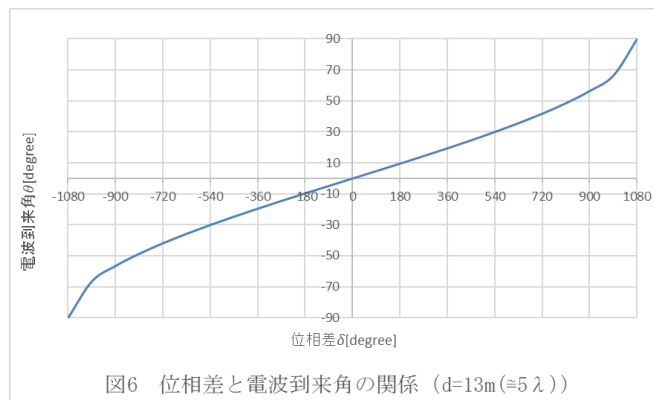


図6 位相差と電波到来角の関係（ $d=13\text{m}(\cong 5\lambda)$ ）

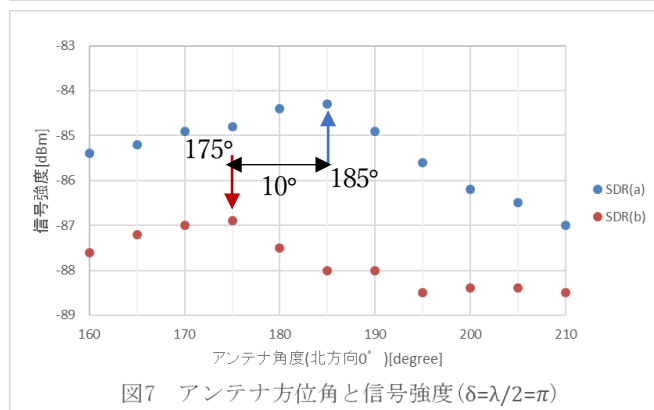


図7より、SDR(a)では、信号強度が最大値をとるアンテナ方位角度は $185^\circ$ で送信局方向に対して最大強度を持っており、SDR(b)では、信号強度が最大値をとるアンテナ方位角度は $175^\circ$ で送信局方向に対して $-10^\circ$ 離れた方向に最大強度を持っており、干渉計の精度を持っており、機能していると考えられている。受信局を中心として、SDR(a)を用いるとアンテナ方向を観測することができ、SDR(b)からは、位相差の分だけずれた角度を観測することが可能であることがわかる。本研究における干渉計システムの原理から、地震の前兆現象を捉えるための観測の1つとして、地震発生領域を特定するという課題に対して適しているのではないかと考えられる。

### (3) 見通し外電波伝搬観測

電磁気学的地震前兆現象の他に、見通し外電波伝搬の例として流星が挙げられる。見通し外電波伝搬観測システムを構築する上で流星電波観測が可能であるシステムを作り上げることが必要となる。本研究における概要を以下に示す。

- ・観測日時：2018年11月8日～2019年2月20日
- ・観測場所：法政大学小金井キャンパス中庭
- ・観測者：森 勝哉（法政大学大学院理工学研究科）
- ・観測周波数：116.30MHz（仙台 VOR），  
116.6.6MHz（宮古 VOR）
- ・受信アンテナ：MSPRO FM5（5素子八木アンテナ）
- ・2分配器：MSPRO SP2CAD
- ・受信機：SDR を用いる。（DVB-T+FM+DAB(820T2&SDR)）
- ・受信モード：LSB(目的周波数より 800Hz ずらして設定)
- ・PC：Windows 10 Pro，  
Intel Core i7-6500U CPU @2.50GHz 2.59GHz，  
実装メモリ 4.00GB
- ・ソフトウェア：SDR Console(V3)，MROFFT

周波数を仙台 VOR116.3MHz に設定して行った観測において、観測データ例を図8に示す。この観測においては、 $d \approx 5m (\approx 2\lambda)$ ，SDR を1つ用いてアンテナ方向のみの観測を行った。見通し外電波伝搬観測において、頻繁に電波が受信されるものの1つが流星エコーである。流星は地球大気圏まで突入し、その経路上にプラズマ化された状態が瞬間的に作り出される。流星が創出するプラズマチューブが電波を反射する性質を持っているため、見通し外の普段届かない受信局へ電波を受信させることが可能である。

見通し外電波伝搬観測を大気圏・電離圏の状態や伝搬異常から地震に先行した電磁気学的な変動をグラフから検出できるようにデータ収集を行うことを目指す。

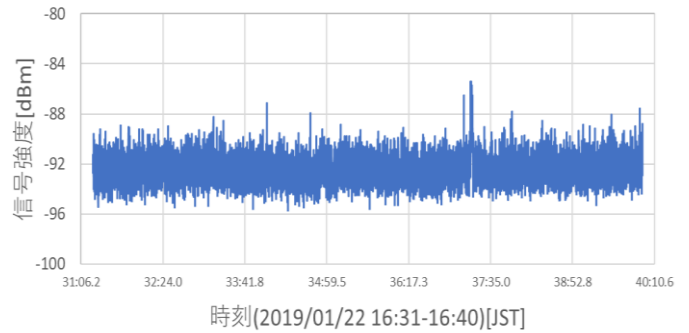


図8 見通し外電波伝搬観測データ

図8より、突出的に信号強度が高くなっている部分において流星により電波が反射されて、受信局にて仙台 VORからの電波を間接的に受信していることが確認できる。信号強度が高くなっている部分において、流星エコーであるか、飛行機エコーなどの他の影響であるかを判別するためにMROFFTを使用している。流星電波観測は一般的に行われており、判別しやすいと考えている。

図8のように見通し外電波伝搬観測で横軸時刻、縦軸信号強度のグラフ化をすることで、地震前兆現象を捉えられる可能性がある。通常の基線がうねる現象や基線が太くなる現象などの変異が起こることによって地震が発生するのではないかと考えられている。これらの地震前兆波形から地震の領域・規模・発生時期を統計的なデータをもとに算出し、短期的な地震予知を成功させる（予知的中率を上げる）ことを目指す。見通し外電波伝搬観測から地震予知の可能性を高めるためには、多大なデータが必要であり、それをどのようにして形式化していくかが重要であると考えられる。そのため、本研究においてSDRを用いることによって、安価かつより小さなスペースで構築可能なシステムを検討した。構築しやすいシステムを導入することにより、研究者だけでなく誰にでも構築でき、データ収集のために役立つことができればと考えている。本システムにおいて、今後さらにデータを収集し、それをどのようにしてデータを整理し見やすいものへしていくかが課題であると考えられる。具体的には、ある一定時刻（一定時間）でグラフを作成し、アップデートできる環境を実現することが考えられる。膨大なデータを少しでもわかりやすく見やすい形で記録するかを重要視する必要があるとともにシステム自体の精度もより高いものへする必要があると考えられる。



## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、指導教員である春日隆教授には、さまざまな選択肢やアイディアを与えてくださり、終始ご指導を頂いた。心から感謝するとともに深くお礼申し上げる。本研究の中心であるシステム構築において電波観測ライブを提供する杉本弘文氏、千葉大学服部克己氏、早川地震電磁気研究所早川正士氏にアドバイスをいただき、ご協力いただいた。また、法政大学小金井キャンパス内にて研究をさせていただくにあたり、さまざまな職員方や関係者における協力や配慮をしてくださり、大変貴重な機会を与えてくださったことを心から感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 小暮裕明/小暮芳江著：図解入門よくわかる 最新無線工学の基本と仕組み，秀和システム，2012
- 2) 電気通信振興会編集・発行，入門 アンテナおよび電波の伝わり方，2007
- 3) 林泉・石井彰三・堀田栄喜・日高邦彦著，プラズマ工学演習，朝倉書店，1988
- 4) 後藤憲一，プラズマ物理学，共立出版，1967
- 5) 森勝哉，流星電波観測システムの構築と地震予知，法政大学卒業論文，2017
- 6) 刀根優花，複数の VHF 帯干渉計を用いた地震に関連する FM 見通し外電波伝搬の観測学的研究，千葉大学大学院修士論文，2012
- 7) 安田好広，干渉計を用いた見通し外 VHF 帯観測システムの構築とその観測結果，電気通信大学大学院修士論文，2008

(2019.02.16 受理)